

ポリリズム・タッピングにおけるパーソナル・テンポとパターン形成

田島 誠*・調枝 孝治**

*広島大学大学院生物圏科学研究科

**広島大学総合科学部

Personal tempo and pattern formation in polyrhythmic tapping

Makoto TAJIMA* and Koji CHOSHI**

**Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University,
Higashihiroshima 739, Japan*

***Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University,
Higashihiroshima 739, Japan*

Abstract : Personal tempos in our rhythmic movements have been studied with various tasks. However, no studies have examined the personal tempo in bimanual coordination with interference between the right and left hand movements, because the previous studies used auditory or visual stimuli in acquisition. For the same reason, a formation of the bimanual coordination pattern could not be examined. Therefore, the purposes of this study were to compare personal tempos produced by a single-rhythmic tapping and a 3:2 polyrhythmic tapping, and to clarify a mechanism of the 3:2 polyrhythmic pattern formation from a viewpoint of entrainment.

Intertap intervals (ITIs) of each rhythmic tapping by ten subjects were analyzed. Results showed that the single-rhythmic tapping produced ITIs which were similar to ITIs of 3-beat sequence in the 3:2 polyrhythmic tapping. This suggests that there exist consistency between the single-rhythmic tapping and polyrhythmic tapping with a personal tempo. Another result showed that 2:1 and 1:1 patterns were emerged before the formation of 3:2 pattern. Such a shift is expressed in Farey tree that shows frequency ratios at entrainment. We found that the complicated pattern was formed through the formation of more stable patterns formed by entrainment.

Key words : polyrhythmic tapping, personal tempo, pattern formation, entrainment, Farey tree

序 論

我々の行動の中には多くのリズム運動が内在している。一般に、そのようなリズム運動には固有テンポ (eigen-tempo) が存在しており、特に個人が自然に選択する好みのテンポをパーソナル・

テンポ (personal tempo)、または選好テンポ (preference tempo)、精神テンポ (mental tempo) と呼んでいる。パーソナル・テンポの特徴として、個人間変動が大きいことと個人内変動が小さいことが挙げられる。Fraisse (1982)³⁾によれば、パーソナル・テンポの平均時間間隔は600ms 前後と考えられているが、その時間間隔は380~880ms の範囲にあり、個人差が非常に大きいことが示されている。対照的に、個人内の変動はわずかで、1回の試行の中でのパーソナル・テンポの変動は平均時間間隔の3~5%であり、これは380~880ms の時間の長さにおける弁別閾値の範囲内である³⁾。パーソナル・テンポのもう1つの特徴として、課題間の一貫性の問題が挙げられる。これは「しゃべるのが速い人は歩くのも速い」というようなすべての行動を通じて同じテンポが存在するかどうかという問題であり、課題の「一般性」対「特殊性」の問題と考えることができる。この問題に対して、どのような課題でも同じテンポが存在するという一般性を支持する報告と、すべての課題を通じた単一のテンポは存在しないという特殊性を支持する報告が存在している¹⁰⁾。現在では、すべての課題を通じて一貫したテンポが存在するという一般性は認められないが、類似課題のパーソナル・テンポは関連が深いという結論に落ち着いている¹⁰⁾。しかし、類似した課題であっても、運動部位間に相互干渉が生じるような状況でのパーソナル・テンポの課題間の一貫性については、これまでのところまったく明らかにされていない。

ところで、我々のリズム運動の中には、複数の運動部位間に相互干渉が発生するような複雑な協応運動が存在している。一般に、生体が何らかの行動を行う際には、1つの身体部位だけが単独に動くことはなく、複数の部位が同時に協応して動いている。単純に腕を曲げる際にも、主動筋と拮抗筋が協応して作用しており、さらにそれぞれの筋を構成している多数の筋線維も同時に作用している。以上のように、生体が運動する際には、生体を構成する複数の身体部位の動作が必ず協応して運動パターンを形成しているのである。このような協応したリズム運動のパターン形成に関与する現象として、各身体部位間の相互作用によって運動パターンが創発されるというダイナミカル・アプローチの観点から引き込み現象が考えられている。引き込み現象 (entrainment) とは、時間領域における自己組織化の一種で、複数の非線形振動子 (non-linear oscillators) 間の同調現象のことである⁹⁾。運動制御に対するダイナミカル・アプローチでは、運動部位を支配する神経系をその特性から非線形神経振動子として捉えることによって、運動パターンの形成について引き込み現象の観点から検討している。この非線形神経振動子間の引き込み現象による協応したリズム運動のパターン形成は、大脳を除去したネコの中脳刺激による歩行運動実験や四足動物による歩調変化 (ウォーク→トロット→ギャロップ)、ならびにロボットの歩行運動シミュレーション実験において実証されている^{18-20, 26)}。また、人間を用いた実験として、左右の手を振動数比1:1で周期動作させるという運動実験が挙げられる。例えば、運動開始時の初期設定として、左右の手間の位相関係を0.0 (同相モード: in-phase mode) から0.5 (逆相モード: anti-phase mode) を介して0.9までの10段階に分けて運動を開始すると、正確で安定したパフォーマンスは同相モードと逆相モードの場合にしか観察されない²⁴⁾。それら以外の位相モードでは、逆相モードと同相モードのうち、初期設定された位相モードに近接したどちらか一方の位相モードへと引き込まれるという相転移 (phase transition) が生じる²⁴⁾。また、徐々に運動の振動数(単位時間当たりの振動数、つまり周波数)を増加させていくと、逆相モードから同相モードへの相転移が生じるのである^{2, 5-8, 13)}。

以上のように、右手と左手が1:1の振動数比で周期動作した場合の運動パターンは、振動数と位相関係に対して散逸構造的に最も安定な位相モードへと相転移するという各手間の位相の引き込み現象によって形成されることが示されている。また、ピアノやドラムの演奏、タイピングなどにみられる両手のリズム運動には、右手と左手の振動数比が互いに整数倍でない非常に複雑な協応関

係が認められる。最近では、このような複雑な両手協応を必要とするリズム運動課題として、ポリリズム・タッピング (polyrhythmic tapping) が用いられ、両手協応のタイミング・メカニズムやストラテジーについて検討されている^{1,4,12,14-17,21-23}。

しかし、これまでの研究では、ポリリズム・タッピングといった複雑な両手協応を必要とする運動を遂行する際のパーソナル・テンポについては全く報告されていない。その理由として、刺激提示による先行練習なしでは、ポリリズム・タッピングの遂行が非常に困難であることが挙げられる。上述した先行研究では、習得段階として音(または光)刺激系列を提示し、その刺激系列に同期させるという刺激 (S : stimulus) - 反応 (R : response) 事態によってポリリズム・タッピングを習得させた。そのため、ポリリズム・タッピングのテンポは刺激提示間隔が目標テンポとなり、個人が自由に好きなテンポでタッピングするというパーソナル・テンポを測定することができなかつたのである。また、同様の理由によって、ポリリズム・タッピング実験での学習初期段階における R - R 間隔 (response-response interval) によるパターン形成について検討することができなかつた。

そこで本研究では、上述したポリリズム・タッピングのパーソナル・テンポと学習初期段階におけるパターン形成について検討することを目的とした。そのため本実験では、複雑な両手協応運動の中でも最も構造が単純で、S - R 事態による同期学習を行わなくても遂行できる可能性のある 3 : 2 ポリリズム・タッピングを運動課題とし、刺激系列を提示する同期学習を行わずに、最初から被験者の任意のテンポで遂行させることにした。この実験によって、複雑な両手協応タッピングのパーソナル・テンポと片手タッピングのパーソナル・テンポを比較し、類似課題間の一貫性の問題を明らかにする。さらに、両手協応タッピングのタイミング・メカニズムをパーソナル・テンポの観点から検討することにした。また、本実験では目標となる刺激系列との同期学習を行わないことから、3 : 2 ポリリズム・パターンがまったく形成できない初期状態からパターンとして形成されていく過程を反応間隔から検討することが可能である。したがって、学習初期段階からのパターン形成の過程をダイナミカル・アプローチにおける引き込み現象の観点から検討し、複雑な両手協応運動のパターン形成のメカニズムを明らかにする。

実験方法

1. 被験者

20~24才の大学生ならびに大学院生10名を用いた。この10名のうち8名が右利きで、2名が左利きであった。

2. 実験課題

本実験の運動課題として、シングルリズム・タッピングと3 : 2 ポリリズム・タッピング (Fig.1) を用いた。各被験者は、シングルリズム・タッピングでは、利き手だけを用いて一定の任意のテンポでモールス・キーをタッピングしなければならなかつた。また、3 : 2 ポリリズム・タッピングでは、右手で3拍子タッピングしながら、同時に左手で2拍子タッピングしなければならなかつた。ただし、ポリリズムのサイクル間隔時間は指定しなかつたため、被験者には任意のテンポでタッピングさせた。

3. 実験手続き

全ての被験者にシングルリズム・タッピングを1試行とポリリズム・タッピングを3試行遂行させた。各試行は60秒間とし、試行間には60秒間の休憩を挿入した。ただし、ポリリズム・タッピングを行う前に、3 : 2 ポリリズムのダイアグラム (Fig. 1) を提示して、右手は3拍子、左手は2

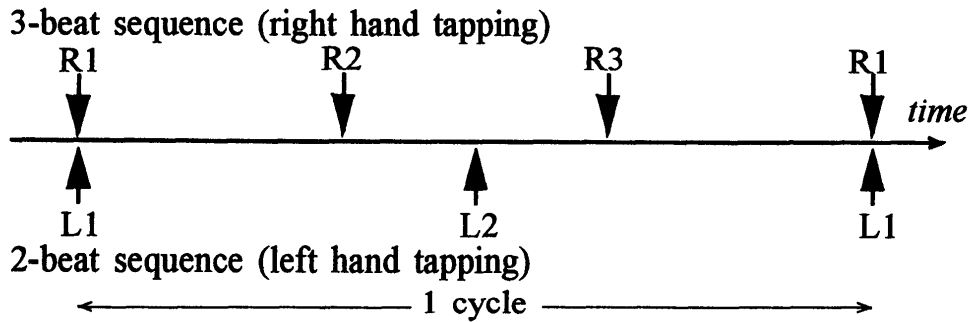


Fig. 1 Diagram of 3:2 polyrhythm.

拍子でタッピングしなければならないことを教示した。また、各拍子のテンポは被験者が任意に決定することができることも教示した。遂行した試行の順序として、シングルリズム・タッピング（1試行）の次にポリリズム・タッピング（3試行）を行った。

4. 反応測定

本実験では、被験者が行ったタッピングとタッピングとの間の時間インターバル（intertap intervals: ITI）を従属変数として測定した。ただし、ポリリズムとシングルリズムを比較するために、各手毎に ITI を測定した。さらに、右手と左手の同時タッピングから次の同時タッピングまでを 1 サイクルとし、ポリリズム・タッピングの振動数比（左手の振動数/右手の振動数）は 1 サイクル毎に以下のように算出した。

$$\text{振動数比} = (1 / \text{左手の ITI の平均値}) / (1 / \text{右手の ITI の平均値})$$

また、同時タッピングの基準として、右手と左手のタッピングの時間差が $\pm 50\text{ms}$ 以内であることとした。

結 果

1. シングルリズム・タッピングとポリリズム・タッピングのパーソナル・テンポ

シングルリズム・タッピングと 3:2 ポリリズム・タッピングの各手において産出された ITI の平均値と標準偏差、ならびに変動係数の平均値を Table 1 に示した。ただし、被験者間の変動性を観察するために、Table 1 に示した標準偏差は被験者内の標準偏差と被験者間の標準偏差を合成せず、10名の被験者の ITI の平均値を平均した際の標準偏差だけを示している。また、被験者内の変動性を観察するために変動係数を求めた。変動係数は被験者内の標準偏差を被験者内の平均値で割り、百分率で表わした関数であるため、被験者毎に異なった ITI の変動性を比較することができ、被験者内の変動性を観察することができる。

シングルリズム・タッピングにおいて産出された ITI の平均値と標準偏差は 633.7ms ($SD = 159.1\text{ms}$) であり、Fraisse (1982)³⁾ が示したパーソナル・テンポの平均反応間隔時間である 600ms 前後という値と近似していた。また、この ITI の平均値と標準偏差から、被験者間の変動係数は 25.1% であり、個人間の変動性が大きいことが示された。逆に、被験者内の変動係数の平均値は 4.7% という低い値を示したことから、個人内の変動性が小さいことが示された。

これに対し、ポリリズム・タッピングによって産出された第 1 ~ 3 試行目における各手の ITI の

Table 1 Means, SDs and CVs (coefficients of variation) of ITIs produced by single-rhythmic and polyrhythmic tapping.

	single-rhythm	polyrhythm					
	1st trial	1st trial		2nd trial		3rd trial	
	preferred	left	right	left	right	left	right
Mean	633.7	1668.5 **	889.3 **	1088.4 **	727.8	959.3 **	596.2
SD	159.1	605.2	198.6	336.2	224.2	275.9	151.3
CV	4.7	33.7 **	42.0 **	23.8 **	26.5 *	16.5	21.2 *

(Mean & SD: ms; CV:%)

(**: $p < .01$; *: $p < .05$)

平均値と標準偏差、ならびに変動係数の平均値は試行数にともなって小さくなっていく傾向がみられた。特に、第3試行目における右手のITIの平均値(596.2ms)は、Fraisse (1982)³⁾が示したシングルリズム・タッピングのパーソナル・テンポと近似していた。また、被験者間の標準偏差も大きく、個人間の変動性が大きいことが示された。さらに、被験者内の変動性を示す変動係数の平均値は、左手で16.5%、右手で21.2%と高い値を示し、個人内の変動性が大きいことを示した。

次に、シングルリズム・タッピングにおけるITIと変動係数の各平均値とポリリズム・タッピングにおけるITIと変動係数の各平均値をt検定により比較した。その結果、シングルリズム・タッピングのITIの平均値は、ポリリズム・タッピングの第1試行の左手($t=5.03$, $df=9$, $p < .01$)と右手($t=4.74$, $df=9$, $p < .01$)、第2試行の左手($t=59.0$, $df=9$, $p < .01$)と右手($t=2.36$, $df=9$, $p < .05$)、ならびに3試行の左手($t=3.24$, $df=9$, $p < .05$)のITIの平均値よりも有意に小さかった。また、シングルリズム・タッピングのITIの変動係数の平均値は、ポリリズム・タッピングの第1試行の左手($t=4.58$, $df=9$, $p < .01$)と右手($t=3.79$, $df=9$, $p < .01$)、第2試行の左手($t=3.30$, $df=9$, $p < .01$)と右手($t=5.63$, $df=9$, $p < .01$)、ならびに第3試行の右手($t=3.05$, $df=9$, $p < .05$)の変動係数の平均値よりも有意に低いことが示された。以上の結果から、シングルリズム・タッピングのパーソナル・テンポとポリリズム・タッピングの第2、3試行目の右手のパーソナル・テンポは、反応間隔時間と個人間の変動性において一致していたが、個人内変動性においては異なっていたことが示された。

2. シングルリズムとポリリズムのパーソナル・テンポの関連性

各リズム・タッピングにおけるパーソナル・テンポの被験者間での関連性を検討するために、シングルリズム・タッピングにおける各被験者毎のITIの平均値と、ポリリズム・タッピングの第1~3試行目における各被験者毎の各手のITIの平均値間の相関をTable 2に示した。シングルリズム・タッピングのITIは、ポリリズム・タッピングにおける左手のITIよりも右手のITIとの間に高い正の相関を示した。この結果から、シングルリズム・タッピングにおけるパーソナル・テンポとポリリズム・タッピングにおける右手のパーソナル・テンポとの間に高い関連性があることが示された。

次に、各リズム・タッピングにおけるパーソナル・テンポの被験者内での関連性を検討するため

Table 2 Correlation coefficients between personal tempos of single-rhythmic tapping and polyrhythmic tapping.

1st trial		2nd trial		3rd trial	
single-left	single-right	single-left	single-right	single-left	single-right
-0.148	0.512	0.531	0.652	-0.123	0.306

に、各被験者毎に、シングルリズム・タッピングにおける ITI と、ポリリズム・タッピングの第 1～3 試行目における各手の ITI 間の各相関を求めた。Table 3 には各被験者の相関係数を z' 変換と逆 z' 変換して計算した平均値を示した。第 1～3 試行を通して各手とも無相関に近く、関連性が小さいことが示された。

Table 3 Means of correlation coefficients across all subjects between ITIs of single-rhythmic tapping and polyrhythmic tapping.

	1st trial		2nd trial		3rd trial	
	single-left	single-right	single-left	single-right	single-left	single-right
Mean	-0.022	0.026	0.046	-0.025	-0.005	0.048

3. ポリリズム・パターンの形成

3 : 2 ポリリズム・パターンが形成される過程を検討するために、遂行したサイクル数に対する右手と左手の振動数比の変化を求めた。Fig. 2-(A)、(B)、(C)は典型的なパターン形成の過程を示した3名の被験者の第1～3試行にわたる右手と左手の振動数比(左手/右手)の変化を示している。Fig. 2-(A)、(B)は、試行開始直後では3 : 2ポリリズム・パターンを形成できなかったが、最終的には形成することができた被験者のデータである。これに対し、Fig. 2-(C)は第1～3試行を通して全く3 : 2ポリリズム・パターンを形成できなかった被験者のデータである。

Fig. 2 に示した3名の被験者を含めた10名の被験者に共通していた特徴として、目標振動数比である $2/3$ (3 : 2 と同義、以下同様) のパターンを達成する前に、 $1/1$ と $1/2$ 、 $1/3$ といった特定の振動数比への移行を繰り返していたことが観察された。Fig. 2-(A)では第1試行の途中から $2/3$ のパターンを形成していたが、その後も $1/1$ や $1/2$ のパターンへの移行が示されていた。また、Fig. 2-(B)では第1、2試行において $1/1$ と $1/2$ のパターンへの移行が観察されたが、第2試行の途中から $2/3$ のパターンを形成していた。さらに Fig. 2-(C)では、 $1/1$ と $1/2$ 、 $1/3$ のパターンへと引き込まれたまま、最終的に $2/3$ のパターンを全く形成できなかった。以上のように、3 : 2 のパターンが形成される過程が示された。

考 察

1. ポリリズム・タッピングのパーソナル・テンポ

本研究では、片手動作によるシングルリズム・タッピングと両手動作によるポリリズム・タッピ

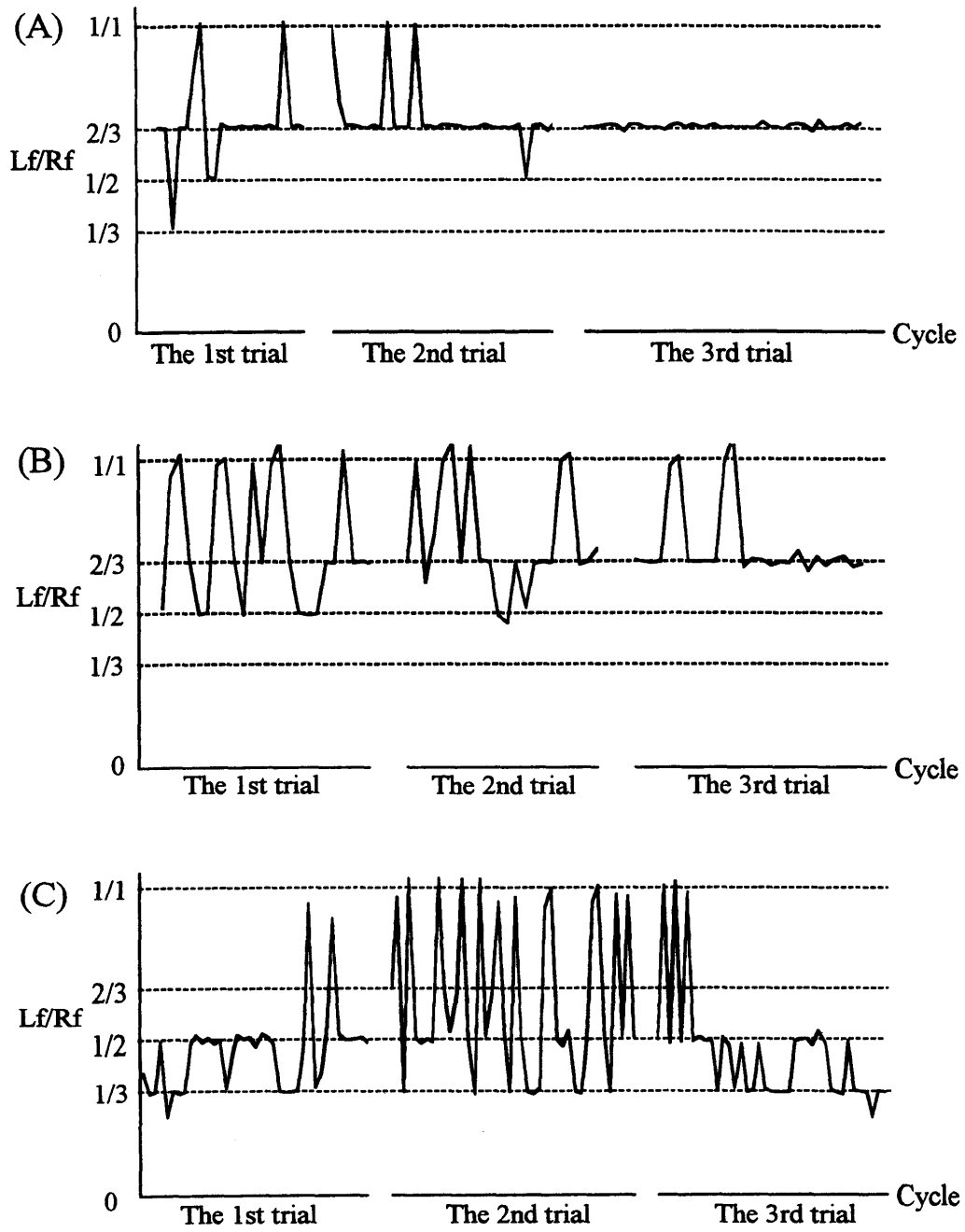


Fig. 2 Three typical transition routes.

On the y-axis, the observed frequency ratio (Lf / Rf) per cycle is presented. The Lf indicates the frequency of left hand tapping, and the Rf indicates the frequency of right hand tapping.

ングという運動動作が全く同一であるが、両手間に相互干渉が存在する場合と存在しない場合のタッピング動作のパーソナル・テンポを比較した。本研究で行ったシングルリズム・タッピングに

おけるパーソナル・テンポは、Fraisie (1982)³⁾ が示した反応間隔時間 (約600ms) と小さい個人内変動性、ならびに大きい個人間変動性と一致していた。これに対し、ポリリズム・タッピングにおけるパーソナル・テンポは、個人内でも、個人間でも非常に大きい変動性を示したが、遂行した試行数の増加にともなって個人内の変動性は減少していた。さらに、右手のパーソナル・テンポとシングルリズムのパーソナル・テンポとの間には有意な差は示されなかった。また、シングルリズムとポリリズムのパーソナル・テンポの被験者間における相関は、右手において高い正の値を示した。以上のことから、シングルリズムとポリリズムのパーソナル・テンポには課題間の一貫性が認められ、相互干渉があるような場合でも一貫したパーソナル・テンポを発現できることが見出された。しかし、シングルリズムとポリリズムのタッピングの被験者内における相関は、ほとんど無相関に近かった。以上のことから、シングルリズム・タッピングとポリリズム・タッピングは異なったタイミング制御を行っていることが見出された。

2. ポリリズム・タッピングのパターン形成

本研究において目標パターンとした3:2ポリリズム・パターンが形成される過程について、右手と左手のダイナミックな引き込み現象の観点から検討し、学習によるパターン形成のメカニズムを明らかにすることを目的とした。先行研究によると、1:1の振動数比における運動パターンは、右手と左手の引き込み現象による位相間の転移によって形成されることが示唆されている^{2,4-7,13,24)}。また、Peper et al. (1995)¹¹⁾ は、非常に複雑な構造を持つ3:8と5:8ポリリズム・パターンが、各手の運動の振動数の増加にともなって、より単純な構造の2:5と3:5ポリリズム・パターンへと転移することを示した。ここで、熱力学第二法則として知られているエントロピー増大の法則に従うと、パターン (秩序) は次第に崩壊していく方向へと変化していく。しかし、生命系のような非平衡開放系においてはエネルギー散逸が継続的に発生するために、パターンは一方的に崩壊するのではなく、ある構造を自己組織化することが知られている。したがって、以上の先行研究の結果から、既習の運動パターンが不安定になると、よりエネルギー散逸構造的に安定した (他のパターンへ移行しにくい) パターンへと移行して、新たなパターンが形成されることが見出されている^{2,5-8,11,13,24)}。

しかし、人間の行動の中には非常に複雑で、エネルギー散逸構造的にも不安定な運動パターンも形成されている。そのような複雑な運動パターンの形成に対して、先行研究からの知見では説明することができなかった。ここで、本研究で示されたパターン形成の過程は、エネルギー散逸構造的に非常に安定している1:1パターンから、2:1や3:1パターンへの移行が示され、さらにエネルギー散逸構造的により不安定な3:2ポリリズム・パターンへの移行が示された。このように、単純な運動パターンからより複雑な運動パターンへと移行して、新しい運動パターンが形成されることが見出された。以上のことは、先行研究によって示された安定したパターンから、より複雑なパターンへと移行していくというエントロピー増大による変化とは逆の過程が示されている。このような移行の特徴は、Fig. 3に示したファーリーの樹 (Farey tree)^{11,25)} によって示すことが可能である。このファーリーの樹は、引き込み現象による2つの振動子の振動数比の関係を表わしている。ファーリーの樹と引き込み現象の関係は以下のように説明される²⁵⁾。

エントロピー増大の法則によると、自然現象はすべて秩序が次第に壊れていく方向に変化する。しかし、自然界における生命や進化、学習などの現象は、エネルギーを散逸させて、新しい構造や機能を形成するという自己組織化現象 (時間領域に対しては、特に引き込み現象) が観察されている。つまり、時間的・空間的な動的秩序が自発的に形成されるのである。特に、2つの非線形振動子の引き込みのパターンには、Fig. 3に示したような特徴が内在している。ここでは、2つの非線形

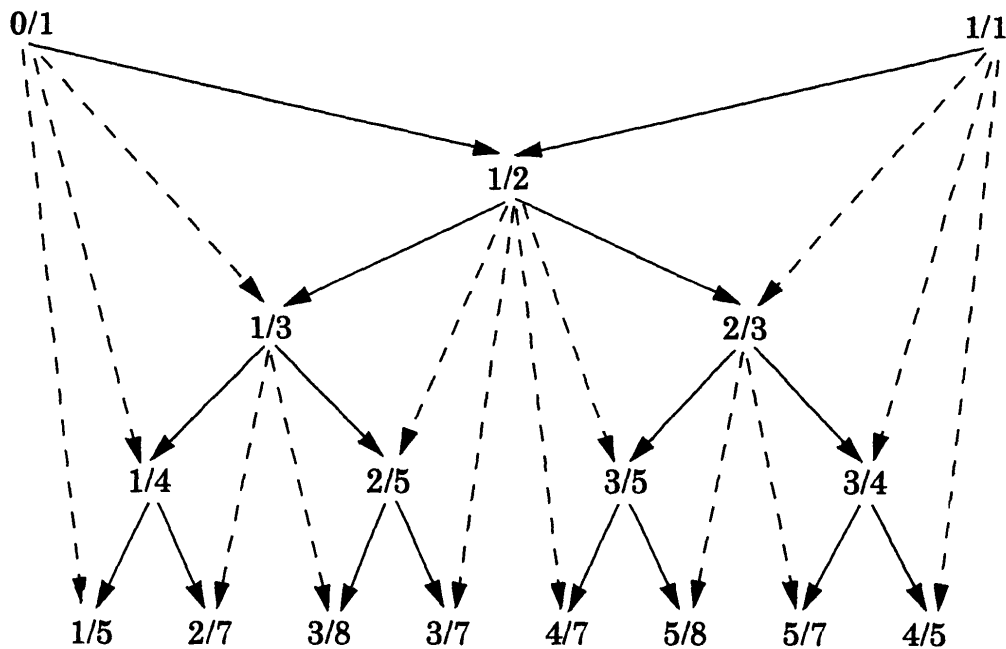


Fig. 3 Schema of Farey tree (Peper et al.,1995; Yoshikawa, 1992).
 Farey tree indicates the relation of frequency of the entrainment. Level indicates complication of structures in relation. As low level, it is simple and stable.

振動子の振動数が全く同じになったときの引き込み（1：1の同調）を1／1と表す。したがって、振動数が1：2に同調したときには1／2となる。一般に、引き込みの振動数は簡単な整数の比になるが、それぞれの引き込みのモードの間には Fig. 3 のような関係が成り立つ。このファリーの樹の中では、上に位置するモードのほうが起こりやすい。例えば3：7に同調している振動のモードは、少しパラメータが変化すると、2：5かまたは1：2の引き込みのモードに移る。ファリーの樹における互いの分数の関係は、

$$p/q \langle + \rangle r/s = (p+r) / (q+s)$$

という非常に簡単なルールで決まっている。つまり、分子同士、分母同士を別々に足し算して、できる分数がより下位の数となる。

以上の説明にあるような特徴を持ったファリーの樹が示すように、自己組織的にパターン形成が行われることが見出された。本研究の結果では、学習初期ではレベルの低い1：1や2：1のパターンしか形成されていなかったが、試行数が進むにつれてよりレベルの高い3：2のパターンが形成されていた。以上のことから、学習によって、より複雑な構造を持つ運動パターンを形成する際には、エネルギー散逸構造的に安定した位相関係に引き込まれたパターンから、より複雑なパターンへと移行して形成されることが見出された。

しかし、人間の活動の中には、上述してきたような観点からだけでは説明できない複雑さや多様性が内在している。そのような複雑で多様性のあるパターンの形成には、認知的・心理的要因が大きく関与していることはおそらく間違いないだろう。今後は、そのような観点からもアプローチし

ていき、複雑な運動パターンの形成に対してダイナミカルな要因と認知的な要因を相補的に研究し、解明していくことが期待される。

引用文献

- 1) Deutsch, D. 1983 The generation of two isochronous sequences in parallel. *Perception & Psychophysics*, **34**, 331-337.
- 2) Haken, H., Kelso, J. A. S. & Bunz, H. 1985 A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, **51**, 347-356.
- 3) Fraisse, P. 寺西立年・大串健吾・宮崎謙一(訳) 1987 リズムとテンポ ダイアナ・ドイチュ(編) 音楽の心理学 西村書店 Pp.182-220. (Fraisse, P. 1982 Rhythm and tempo. In D. Deutsch (ED.) *The Psychology of Music*. New York: Academic. Pp.149-180.)
- 4) Jagacinski, R. J., Marshburn, E., Klapp, S. T. & Jones, M. R. 1988 Tests of parallel versus integrated structure in polyrhythmic tapping. *Journal of Motor Behavior*, **20**, 416-442.
- 5) Jeka, J. J. & Kelso, J. A. S. 1995 Manipulating symmetry in the coordination dynamics of human movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **21**, 360-374.
- 6) Kelso, J. A. S. 1984 Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*, **240**, R1000-R1004.
- 7) Kelso, J. A. S. & Schöner, G. 1988 Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, **7**, 27-46.
- 8) Kelso, J. A. S. 1994 Elementary coordination dynamics. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (EDs.), *Interlimb Coordination: Neural, Dynamical, and Cognitive Constraints*. New York: Academic Press. Pp. 301-318.
- 9) 蔵本由紀 1991 引き込み現象の数理 蔵本由紀・川崎恭治・山田道夫・甲斐昌一・篠本 滋(共著) パターン形成 朝倉書店 Pp.149-186.
- 10) 平 伸二 1996 精神テンポの発現機構 松田文子・調枝孝治・甲村和三・神宮英夫・山崎勝之・平 伸二(編) 心理的時間～その広くて深いなぞ～ 北大路書房 Pp.169-182.
- 11) Peper, C. E., Beek, P. J. & van Wieringen, P. C. W. 1995 Frequency-induced phase transitions in bimanual tapping. *Biological Cybernetics*, **73**, 301-309.
- 12) Shaffer, L. H. 1980 Analysing piano performance: A study of concert pianist. In G. E. Stelmach & J. Requin(EDs.), *Tutorials in Motor Behavior*. North-Holland Publishing Company. Pp. 443-455.
- 13) Schöner, G. & Kelso, J. A. S. 1988 Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. *Science*, **239**, 1513-1520.
- 14) Summers, J. J. & Kennedy, T. M. 1992 Strategies in the production of a 5:3 polyrhythm. *Human Movement Science*, **11**, 101-112.
- 15) Summers, J. J., Rosenbaum, D. A., Burns, B. D. & Ford, S. K. 1993a Production of polyrhythms. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **19**, 416-428.
- 16) Summers, J. J., Ford, S. K. & Todd, J. A. 1993b Practice effects on the coordination of the two hands in a bimanual tapping task. *Human Movement Science*, **12**, 111-133.

- 17) Summers, J. J. & Pressing, J. 1994 Coordinating the two hands in polyrhythmic tapping. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion & P. Casaer (EDs.), *Interlimb Coordination: Neural, Dynamical, and Cognitive Constraints*. New York: Academic Press. Pp. 571-593.
 - 18) Taga, G., Yamaguchi, Y. & Shimizu, H. 1991 Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biological Cybernetics*, **65**, 147-159.
 - 19) 多賀巖太郎 1994 歩きをデザインする～二足歩行の自己組織化～ 科学, **64**, 19-26.
 - 20) 多賀巖太郎 1996 生命システムのデザイン原理をさぐる～人間の歩行運動から～ 数理科学, **394**, 5-13.
 - 21) 田島誠・調枝孝治 1996 5:3ポリリズム・タッピングで採用される学習ストラテジー 広島大学総合科学部紀要IV理系編, **22**, 129-141.
 - 22) 田島 誠 1996 ドラマーのばちさばき 松田文子・調枝孝治・甲村和三・神宮英夫・山崎勝之・平 伸二 (編) 心理的時間～その広くて深いなぞ～ 北大路書房 Pp.217-232.
 - 23) 若林文子・調枝孝治 1995 ポリリズムの習得ストラテジーが保持と転移に及ぼす影響 広島体育学研究, **21**, 29-37.
 - 24) Yamanishi, J., Kawato, M. & Suzuki, R. 1980 Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*, **37**, 219-225.
 - 25) 吉川研一 1992 非線形科学 ～分子集合体のリズムとかたち～ 学会出版センター Pp.15-18.
 - 26) Yuasa, H. & Ito, M. 1990 Coordination of many oscillators and generation of locomotory patterns. *Biological Cybernetics*, **63**, 177-184.
-